

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-148327

(43)Date of publication of application : 07.06.1996

(51)Int.Cl.

H01F 6/00
H05H 7/04

(21)Application number : 06-285207

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 18.11.1994

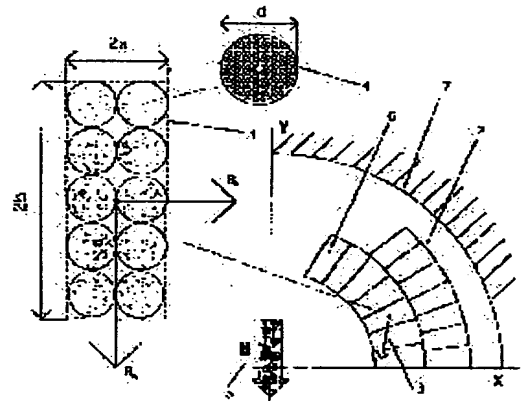
(72)Inventor : SHIDA JIYURIAN
KAKIUCHI SHUNJI

(54) SUPERCONDUCTING MAGNET AND PARTICLE ACCELERATOR WITH THE SUPERCONDUCTING MAGNET

(57)Abstract:

PURPOSE: To enhance the quench characteristics while reducing power consumption by employing a superconductor having such cross-section as reducing the coupling loss between the superconducting strands while taking account of the effect of correlation, between the aspect ratio of the cross-section of superconductor and the magnetic field and the inner resistance of the superconductor, on the coupling loss.

CONSTITUTION: The superconductor 1 in the cross-section 2 of a superconducting electromagnet comprises a set of a plurality of superconducting strands 4 stranded with a predetermined transposition where superconducting filaments are arranged in a stabilization material. Assuming the flux density 3 of a magnetic field, to which the superconductor 1 is exposed, has a component B_a normal to the longitudinal direction of the superconductor 1 and a component B_b in parallel with the longitudinal direction of the superconductor 1 and the electric resistances in these two directions are \bar{r}_{1a} and \bar{r}_{1b} , respectively, the aspect ratio b/a of the cross-section of the conductor 1 is previously designed to minimize the total loss $P_a + P_b$ between the superconducting strands thus reducing the total loss $P_a + P_b$ between the superconducting strands 4.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-148327

(43)公開日 平成8年(1996)6月7日

(51)Int.Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 F 6/00	Z A A			
H 0 5 H 7/04	Z A A			
			H 0 1 F 7/ 22	Z A A C
			5/ 08	Z A A A
審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 11 頁)				

(21)出願番号 特願平6-285207

(22)出願日 平成6年(1994)11月18日

(71)出願人 000005108

株式会社日立製作所
東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72)発明者 志田 ジュリアン

茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会
社日立製作所日立工場内

(72)発明者 垣内 俊二

茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会
社日立製作所日立工場内

(74)代理人 弁理士 武 顕次郎

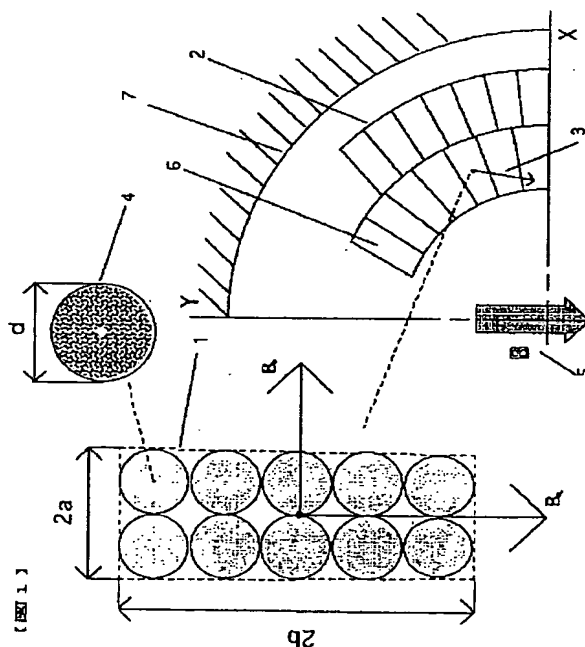
(54)【発明の名称】 超電導磁石及び当該超電導磁石を備えた粒子加速器

(57)【要約】

【目的】 通電電流を励消磁することによって変動磁場を与える交流用超電導磁石において、励消磁時の損失が少なく、磁場均一性の高い超電導磁石を提供する。

【構成】 複数本の超電導素線4を束ねて形成された超電導導体1に垂直に印加される一様な変動磁場に対して、素線間の鎖交磁場変動に基づく結合電流が流れにくくなるよう、前記超電導素線4が所定のピッチでツイストされて形成された超電導導体1を巻き回すことによって磁場を発生するとともに、通電電流を励消磁することによって変動磁場を与える交流用超電導磁石において、変動磁場の磁場分布を考慮して超電導素線間4の結合損失が最も少なくなるように断面アスペクト比 (b/a) を部分的に選択して、前記超電導導体1を巻き回した。

【効果】 超電導導体の超電導素線間結合損失を小さくすることによってクエンチ特性に優れ、全体の電力消費量が小さく、磁場均一性の高い超電導磁石を提供することができる。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 複数本の超電導素線を束ねて形成された超電導導体に垂直に印加される一様な変動磁場に対して、素線間の鎖交磁場変動に基づく結合電流が流れにくくなるよう、前記超電導素線が所定のピッチでツイストされて形成された超電導導体を巻き回すことによって磁場を発生するとともに、通電電流を励消磁することによって変動磁場を与える交流用超電導磁石において、前記超電導導体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値を、変動磁場の磁場分布を考慮して超電導素線間の結合損失が最も少なくなるように部分的に選択して、前記超電導導体を巻き回したことを特徴とする交流用超電導磁石。

【請求項2】 複数本の超電導素線を束ねて形成された超電導導体に垂直に印加される一様な変動磁場に対して、素線間の鎖交磁場変動に基づく結合電流が流れにくくなるよう、前記超電導素線が所定のピッチでツイストされて形成された超電導導体を巻き回すことによって磁場を発生するとともに、通電電流を励消磁することによって変動磁場を与える交流用超電導磁石において、前記超電導導体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値が、当該超電導導体の狭い辺に直交する変動磁場の絶対値を当該超電導導体の広い辺に直交する変動磁場の絶対値で割った値の平方根より大きく、平方根の2倍より小さくなるように前記超電導導体が形成されていることを特徴とする交流用超電導磁石。

【請求項3】 複数本の超電導素線を束ねて形成された超電導導体に垂直に印加される一様な変動磁場に対して、素線間の鎖交磁場変動に基づく結合電流が流れにくくなるよう、前記超電導素線が所定のピッチでツイストされて形成された超電導導体を巻き回すことによって磁場を発生するとともに、通電電流を励消磁することによって変動磁場を与える交流用超電導磁石において、前記超電導導体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値が、当該超電導導体の狭い辺に直交する変動磁場の絶対値を当該超電導導体の広い辺に直交する変動磁場の絶対値で割った値と、当該超電導導体の広い辺に直交する方向の電気抵抗率を当該超電導導体の狭い辺に直交する方向の電気抵抗率で割った値の平方根とを掛け合わせた値の平方根より大きく、平方根の3倍より小さくなるように前記超電導導体が形成されていることを特徴とする交流用超電導磁石。

【請求項4】 前記超電導導体が、前記ツイストされた超電導素線の集合燃線を単位とし、複数の燃線をさらに少なくとも1回ツイストして形成されていることを特徴とする請求項1、2及び3のいずれか1に記載の交流用超電導磁石。

【請求項5】 前記ツイストされた超電導素線と、この超電導素線の集合燃線とのツイスト方向が同一であることを特徴とする請求項4記載の交流用超電導磁石。

2

【請求項6】 前記超電導素線が常電導転移し、通電電流が超電導素線から分流したときに電流を流す低抵抗金属からなる素線を、さらに前記超電導素線に対して並列に配置するとともに、前記低抵抗金属からなる素線を前記超電導素線及び前記集合燃線と逆方向にツイストしたことを特徴とする請求項4または5に記載の交流用超電導磁石。

【請求項7】 前記集合燃線の中央部に抵抗率の高い部材をさらに配置したことを特徴とする請求項4ないし6のいずれか1に記載の交流用超電導磁石。

【請求項8】 前記超電導素線または前記低抵抗金属からなる素線の中にさらに抵抗率の高い金属を複合して配置したことを特徴とする請求項6または7に記載の交流用超電導磁石。

【請求項9】 前記抵抗率の高い部材がCuNiおよびCuSnの少なくとも一方を主成分とする材料によって形成されていることを特徴とする請求項7記載の交流用超電導磁石。

【請求項10】 前記抵抗率の高い部材が合成樹脂からなる絶縁材によって形成されていることを特徴とする請求項7記載の交流用超電導磁石。

【請求項11】 前記抵抗率の高い金属がCuNiおよびCuSnの少なくとも一方を主成分とする材料によって形成されていることを特徴とする請求項8記載の交流用超電導磁石。

【請求項12】 請求項1ないし11のいずれか1に記載の交流用超電導磁石の運転時の最大負荷率が85%以上に設定されていることを特徴とする交流用超電導磁石。

【請求項13】 請求項1ないし12のいずれか1に記載の交流用超電導磁石を備えた粒子加速器。

【請求項14】 超電導導体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値が3以下の交流用超電導磁石を使用したことを特徴とする請求項13記載の粒子加速器。

【請求項15】 鉄芯をさらに備えたことを特徴とする請求項13記載の粒子加速器。

【請求項16】 発生する磁場が2n次成分（nは自然数）であることを特徴とする請求項13、14及び15のいずれか1に記載の粒子加速器。

【請求項17】 前記超電導磁石がソレノイドまたはトロイドのいずれかであることを特徴とする請求項1ないし12のいずれか1に記載の交流用超電導磁石。

【請求項18】 前記ソレノイドまたはトロイドのいずれかの超電導磁石の断面内で磁場方向の磁石の軸両端部側の超電導導体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値が、磁石の軸中央部側の超電導導体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値よりも小さく設定されていることを特徴とする請求項17記載の交流用超電導磁石。

50 【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、超電導磁石の主たる構成要素である超電導導体において、特に素線間の結合損失を少なくするために素線を所定のピッチでツイストして形成した超電導導体およびこの超電導導体を用いた加速器などの粒子偏向用双極電磁石や粒子収束用4極電磁石、超電導大型ソレノイド装置、核融合用ボロイダルコイルのバースマグネット、さらに超電導発電機、変圧器などに使用される交流超電導電力機器に関するものである。

【0002】

【従来技術】この種の超電導導体の内、主として粒子加速器に用いられることを特徴とするものの製作例としては、アイシーエフエイ プロシーディングス オブ ワークショップ オン エイシー スーパーコンダクティビティ、ケイイーケイ プロシーディングス 92-14 (1992年) 100項から108項 (ICFAP Proceedings of Workshop on AC SUPERCONDUCTIVITY, KEK Proceedings 92-14 December 1992 A)に纏められている。

【0003】元来、超電導磁石は、その使用目的に応じて大きく2種類に分類される。すなわち、一定の通電電流を保持して運転する電磁石と、通電電流を変化させて電磁石を励消磁することにより変動磁場を与えるような運転をする電磁石である。後者の、通電電流を変化させて運転をする電磁石において、特に高速度で励消磁することを特徴とする交流用超電導磁石では、超電導磁石を構成する超電導導体内のフィラメント間及び素線間の鎖交磁場変動による誘導電流（この誘導電流は超電導素線内のフィラメントと結合してループを形成するために、従来より結合電流とよばれている。）の発生に伴う不整磁場を低減するため、または結合電流の発生に伴うジュール発熱（このジュール発熱による損失は従来より結合損失とよばれている。）がもたらすクエンチ電流劣化や冷凍機の負荷増加を解決するための手段として、素線のまわりに絶縁被覆層を設けたり、超電導素線の安定化材の周りを高電気抵抗金属で覆うことにより前記結合電流の遮断を図った例が数多くあり、そのひとつが特公昭53-56997号公報に記載されている。

【0004】また、フィラメントを所定のピッチでトランスポジションして前記フィラメント間すなわち素線内の結合電流の遮断をより効果的にすることおよび素線を所定のピッチでトランスポジションして前記素線間の結合電流の遮断をより効果的にすることにより不整磁場や結合損失を低減させた例が数多く実施されている。また、これらの内2つを併せて実施した一例は、特公昭64-24314号公報に記載されている。そこでは、超電導導体内での上記超電導素線および高電気抵抗金属または低電気抵抗金属の各々の配置の仕方を工夫し、もしくはさらに素線を所定のピッチでツイストすることによ

り、交流電流を流す目的に使用した場合と、磁場を発生させる目的に使用した場合の両方において共用することができ比較的低下交流損失の超電導導体について述べられている。

【0005】また、超電導導体断面の幅の広い方の面が超電導磁石内部の磁石線の流れ方向に平行になるように巻回することによって超電導導体内のフィラメント間及び素線間の鎖交磁場変動による誘導電流を低減させる方法が特公昭58-66311号公報に記載されている

10 が、超電導導体断面そのもののアスペクト比およびこのアスペクト比と磁場との相関が結合損失に及ぼす影響についての記述はされておらず、検討されていないことがわかる。

【0006】特に粒子加速器等に代表されるような、比較的大きな規模の装置に用いられている超電導磁石においては、NbTi等の高価な超電導導体の全体量を低減するために、超電導磁石を構成する超電導導体の短尺特性に対して極めて高い負荷率（85%以上）で運転することが望まれており、さらにまたクエンチ発生時に超電導磁石内の超電導導体に局所的に高い熱負荷や電位差がかかることによる損傷を避けるために、超電導磁石内の全ての超電導導体が同様な負荷率で運転されることが望まれている。

20 【0007】ここで、負荷率とは次のように定義される値を示す。図4において、横軸は超電導磁石を構成する超電導導体が経験している磁場、縦軸は超電導導体に流れている電流の密度すなわち、導体に流れている電流を導体中の超電導導体の断面積で割った値を表す。また、線8は超電導導体が経験する磁場とその磁場における臨界電流密度との関係を表している。さらに、線9は超電導導体に流れる電流の密度と、そのときに発生する磁場との関係を表しており、点Aは超電導導体に要求される運転条件を示している。いま、超電導導体に流れる電流の密度を、要求される運転条件から大きくしていくと、超電導導体の状態は点Aから線9に沿って図中の矢印の向きに移動して行き、線8上の点A'まで達したときに電流密度は臨界状態となる。ここに、線分OAと線分OA'との長さの比を負荷率として定義する。上記の理由により、内層と外層とが同じ輸送電流を担うことで電流導入端子の数を減らすという要請から内層と外層の2層の超電導導体を途中で接続して巻き回した超電導双極電磁石においては、外層の超電導導体の方がより大きな電流密度すなわち小さな断面積を持つ構造となっている。同時に、装置の性能向上に伴う大電流化の要求に対して超電導素線の本数が増加してきており、さらにまたフラットワイズで巻き回される超電導導体において曲げ半径rに対してa/rに比例する端部巻線時の歪を起因とするフィラメントの断線等による超電導導体の性能の劣化を小さくするために、超電導導体断面の厚さを小さくする必要がある、このような理由によって超電導導体断面

のアスペクト比が大きな超電導体が使われる結果となっている。

【0008】上記文献(タイシーエフエイ プロシード*

・米国	テパトロン	約6.2	
・独	ヘラ	約6.8	
・米国	リック	約8.3	
・欧州	エル・エッチ・シー	約7.6	(内層用・予定)
・欧州	エル・エッチ・シー	約11.5	(外層用・予定)
・米国	エス・エス・シー	約8.4	(内層用・計画中止)
・米国	エス・エス・シー	約10.1	(外層用・計画中止)

【0010】

【発明が解決しようとする課題】ところで、粒子加速器においては、ビーム寿命がビーム管の真空度に依存すること、イベントを溜めるためには衝突回数が多い方が良く、電力消費量が少ない方が良く、等々の理由により、必要な速度にまで粒子を加速するための時間が短いものが要求されている。そのため、特に建設費の削減や場所的、空間的都合のためにバイポーラ・サイクルで運転される粒子加速器に象徴されるように、その超電導磁石の交流損失が無視できないものとなっていることが指摘されている。他方、製作面においても、超電導磁石において、必要な磁場形状及び磁場精度を出すために要求される断面形状に合致させるために、図1のような超電導素線の断面に対してその厚さ2aが超電導素線の直径dの2倍(2d)より小さい値(86%~93%)となるように撚線成型されていることに加えて、大電流が流れている超電導素体が自らに働く電磁力によって動いたときの摩擦熱によるクエンチ発生を防ぐ目的で、製作時に超電導素体に強い横方向の予備圧力が掛けられるために、剩れ大きなアスペクト比により断面横方向の変動磁場による素線間結合電流が誘導され易い上に、超電導素線間の接触抵抗が小さな値となることによって、超電導素体の断面形状に起因する超電導素線間の結合損失が上記超電導磁石の交流損失に占められる割合が大きくなっていることも指摘されている。

【0011】この問題を解決するために種々の対策が講じられている。超電導素線のトランスポジションピッチを短くした場合には、フィラメント断線の恐れがあり、方形の断面形状が要求される超電導素体においては、おのずと素線のツイストピッチの限界が定められてしまう困難がある。超電導素線の安定化材のなかにCuNi等の高抵抗金属を複合して配置することにより、安定化材の熱的性質すなわち熱伝導性と熱容量とを損なわずに、その電気抵抗だけを高くする方法、表面に酸化銅黒化処理等を施した超電導素線を通常の超電導素線と並列に配置して交互に撚り合わせる一般にゼブラ(Zebra)と呼ばれている方法、超電導素線の表面に銀とスズの合金をメッキする一般にステブライト(Stablite)と呼ばれている方法によって超電導素線間の結合損失を低減する方法が試みられている。

*ィングス)に纏められている世界の主要な超電導双極電磁石の超電導素体断面のアスペクト比を以下に示す。

【0009】

【0012】本発明は、このような技術的背景に鑑みてなされたもので、その第1の目的は、超電導素線間の結合損失が小さい断面形状の超電導素体を持つ超電導磁石を提供することにある。また、第2の目的は、超電導素線間の結合損失が小さい断面形状の超電導素体を持つ超電導磁石を使用した粒子加速器を提供することにある。

【0013】

【課題を解決するための手段】上記第1の目的を達成するために各手段は、以下のように構成されている。

20 【0014】すなわち、第1の手段は、複数本の超電導素線を束ねて形成された超電導素体に垂直に印加される一様な変動磁場に対して、素線間の鎖交磁場変動に基づく結合電流が流れにくくなるよう、前記超電導素線が所定のピッチでツイストされて形成された超電導素体を巻き回すことによって磁場を発生するとともに、通電電流を励消磁することによって変動磁場を与える交流用超電導磁石において、前記超電導素体断面の広い辺の長さを狭い辺の長さで割った値(以下、「アスペクト比」と称する。)を、変動磁場の磁場分布を考慮して超電導素線間の結合損失が最も少なくなるように部分的に選択して、前記超電導素体を巻き回したことを特徴としている。

【0015】第2の手段は、第1の手段と同様の前提の交流超電導磁石において、前記アスペクト比が、当該超電導素体の狭い辺に直交する変動磁場の絶対値を当該超電導素体の広い辺に直交する変動磁場の絶対値で割った値の平方根より大きく、平方根の2倍より小さくなるように前記超電導素体を形成したことを特徴としている。

40 【0016】第3の手段は、第1の手段と同様の前提の交流超電導磁石において、前記アスペクト比が、当該超電導素体の狭い辺に直交する変動磁場の絶対値を当該超電導素体の広い辺に直交する変動磁場の絶対値で割った値と、当該超電導素体の広い辺に直交する方向の電気抵抗率を当該超電導素体の狭い辺に直交する方向の電気抵抗率で割った値の平方根とを掛け合わせた値の平方根より大きく、平方根の3倍より小さくなるように前記超電導素体を形成したことを特徴としている。

50 【0017】なお、第1ないし第3の手段において、前記超電導素体は、前記ツイストされた超電導素線の集合撚線を単位とし、複数の撚線をさらに少なくとも1回ツ

イストして形成するとよい。この場合、前記ツイストされた超電導素線と、この超電導素線の集合燃線とのツイスト方向を同一にするとよい。さらに、前記超電導素線が常電導転移し、通電電流が超電導素線から分流したときに電流を流す低抵抗金属からなる素線を、前記超電導素線に対して並列に配置するとともに、前記低抵抗金属からなる素線を前記超電導素線及び前記集合燃線と逆方向にツイストするようにしてもよい。なお、前記集合燃線の中央部に抵抗率の高い部材をさらに配置してもよいし、前記超電導素線または前記低抵抗金属からなる素線の中にさらに抵抗率の高い金属を複合して配置してもよい。配置される前記抵抗率の高い部材としては、CuNiおよびCuSnの少なくとも一方を主成分とする材料を使用することができ、合成樹脂からなる絶縁材によって形成することもできる。また、前記抵抗率の高い金属としては、CuNiおよびCuSnの少なくとも一方を主成分とする材料によって形成することができる。

【0018】また、第4の手段は、前記超電導磁石を使用した交流用超電導磁石の運転時の最大負荷率を85%以上に設定したことを特徴としている。

【0019】さらに、第2の目的を達成するため、第5の手段は、粒子加速器に第1ないし第3の手段の交流用超電導磁石を使用したことを特徴としている。

【0020】この場合、交流超電導磁石には、アスペクト比が3以下のものを使用するとよく、鉄芯を備えるようにしてもよい。また、発生する磁場は2n次成分（nは自然数）を有するようにするとよい。また、この種の粒子加速器は、核融合、電力貯蔵用、もしくは物性研究用に使用される。

【0021】前記超電導磁石はソレノイドまたはトロイ*30と、

$$P = \left(\frac{B}{\rho} \right) \cdot \left\{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \right\} \cdot \left\{ a^2 + b^2 \left(\frac{7a^4}{30b^4} \right) + a^2 / 6b^2 \right\} + ab \left(2a^2 / 3b^2 \right) \dots (1)$$

となる。この(1)式においては、超電導素線間の、導体の狭い辺に直交する方向の電気抵抗率と導体の広い辺に直交する方向の電気抵抗率（それぞれ ρ_s 、 ρ_o とする）を等しいとして扱っている。

【0023】いま、 ρ_s 、 ρ_o の違いを考慮し、さらに、図1及び図2に示すように、超電導導体1が導体の狭い※

$$P_s = \frac{B_o^2}{\rho_s} \cdot \left\{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \right\} \cdot \left\{ (1/\rho_s) \cdot (a^2 + 2a^3 / 3a + 7b^4 / 30b^2) + (1/\rho_o) (a^2 / 6) \right\} \dots (2)$$

$$P_o = \frac{B_o^2}{\rho_o} \cdot \left\{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \right\} \cdot \left\{ (1/\rho_o) \cdot (b^2 + 2b^3 / 3a + 7b^4 / 30a^2) + (1/\rho_s) (b^2 / 6) \right\} \dots (3)$$

両方向の超電導素線間の結合損失は、それぞれ P_s 、 P_o で与えられるので、超電導素線間の全結合損失は $P_s + P_o$ で与えられることになる。そこで、この全結合損失 $P_s + P_o$ を近似的に最小にするような断面のアスペクト比 b/a について検討する。

*ドのいずれかに設定し、前記ソレノイドまたはトロイドのいずれかの超電導磁石の断面内で磁場方向の磁石の軸両端部側のアスペクト比が、磁石の軸中央部側のアスペクト比よりも小さくなるように設定してもよい。なお、ここでは、アスペクト比が1以下から1以上にまたがる場合は、磁石中央部の超電導導体断面の長い方の辺を基準にして、基準に対して平行な辺の長さを、基準に対して平行でない辺の長さで割ったものをアスペクトとして考える。

10 【0022】

【作用】上記各手段は、基本的に交流用超電導導体の交流損失が最も小さくなるように意図したものである。交流用超電導導体の交流損失は、その損失機構から、超電導フィラメント内のヒステリシス損失、常電導金属すなわち安定化材内の渦電流損失、安定化材を介した超電導フィラメント間の結合損失、そして安定化材を介した超電導素線間の結合損失に大別される。このうち特に超電導導体の断面形状に依存することがわかっている超電導素線間の結合損失については、キャンベル、エイ、エム、クライオジェニクス(1982年)3項から16項(Campbell, A.M. Cryogenics, JANUARY (1982) 3)における考察をもとに、磁束密度 B （以下、表記上の制限により磁束密度を便宜的に「 B 」で示す。）に晒されている。超電導素線のトランスポジションピッチが L_p であるような超電導導体について、超電導素線間の平均電気抵抗率を ρ とすれば、磁束密度 B に垂直な方向の超電導導体の幅を $2a$ 、磁束密度 B に平行な方向の超電導導体の幅を $2b$ としたとき（図1参照）、次式のように導かれる。求める単位体積当たりの結合損失を P で表わす

20 ム、クライオジェニクス(1982年)3項から16項(Campbell, A.M. Cryogenics, JANUARY (1982) 3)における考察をもとに、磁束密度 B （以下、表記上の制限により磁束密度を便宜的に「 B 」で示す。）に晒されている。超電導素線のトランスポジションピッチが L_p であるような超電導導体について、超電導素線間の平均電気抵抗率を ρ とすれば、磁束密度 B に垂直な方向の超電導導体の幅を $2a$ 、磁束密度 B に平行な方向の超電導導体の幅を $2b$ としたとき（図1参照）、次式のように導かれる。求める単位体積当たりの結合損失を P で表わす

※辺に直交する方向の磁束密度 B_s と導体の広い辺に直交する方向の磁束密度 B_o とに晒されている場合を考えると、それぞれの磁束密度の時間変化に対応する結合損失 P_s 、 P_o は(2)及び(3)式ようになる。

【0024】

【0025】いま、 $3a < b$ であるような断面形状の超電導導体を見ると、 P_s 、 P_o はそれぞれ下記の(4)及び(5)式のように近似される。これらをそれぞれ P_s 、 P_o で表すと、

$$\begin{aligned}
 P_{\text{c}} &= B_{\text{c}}^2 \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \cdot a^2 (1/\rho_{\text{c}}) + (1/6 \rho_{\text{c}}) \} \quad \dots (4) \\
 P_{\text{b}} &= B_{\text{b}}^2 \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \} \cdot (7 b^4 / 30 a^2) (1/\rho_{\text{b}}) \quad \dots (5)
 \end{aligned}$$

となる。このとき、超電導素線間の全結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{b}}$ * 【0026】

の最小値は、(6)式のようになる。 *

$$2 B_{\text{c}} B_{\text{b}} b^2 \{ (7/30 \rho_{\text{b}}) (1/\rho_{\text{c}}) + (1/6 \rho_{\text{b}}) \}^{1/2} \times \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \} \quad \dots (6)$$

この最小値をとるときの断面のアスペクト比 b/a は次 * 【0027】

の(7)式で与えられる。 *

$$b/a = (B_{\text{c}}/B_{\text{b}})^{1/2} \cdot \{ (30/7) (\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}} + 1/6) \}^{1/4} \quad \dots (7)$$

さらに、(7)式右辺において、代表的な値として $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}} \approx 1$ とすると、

$$b/a = 1.5 (B_{\text{c}}/B_{\text{b}})^{1/2} \quad \dots (8)$$

となる。つまり、アスペクト比 b/a を

$$(B_{\text{c}}/B_{\text{b}})^{1/2} < b/a < 2 (B_{\text{c}}/B_{\text{b}})^{1/2} \quad \dots (9)$$

とすることによりその効果を得ることができる。 ☆20☆ 【0028】 また、 $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}} \gg 1/6$ の場合は、

$$b/a \approx 2.1 (B_{\text{c}}/B_{\text{b}} (\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}})^{1/2})^{1/2} \quad \dots (10)$$

となり、アスペクト比 b/a を、

$$(B_{\text{c}}/B_{\text{b}} (\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}})^{1/2})^{1/2} < b/a < 3 (B_{\text{c}}/B_{\text{b}} (\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}})^{1/2})^{1/2} \quad \dots (11)$$

とすることによりその効果を得ることができる。

【0029】

【実施例】以下、図面を参照し、本発明の実施例について詳細に説明する。

【0030】図1は本発明の実施例に係る粒子加速器用超電導双極電磁石の超電導導体の断面形状を示す説明図、図2は粒子加速器用超電導双極電磁石の外観を示す斜視図である。これらの図において、超電導双極電磁石断面内の超電導導体1は、安定化材中に超電導フィラメントを配置した超電導素線4を複数本、所定のトランスポジションで撚り合わせた集合体でできている。超電導双極電磁石には鉄芯7が付いており、また各々の超電導導体は電流を理想的な $\cos \theta$ 分布に近づけるように巻かれている。安定化材としては、例えば、銅、アルミニウムなどの低抵抗金属が使用される。なお、安定化材となる素線は前記超電導素線が常電導転移し、通電電流が超電導素線から分流したときに電流を流す低抵抗金属からなる素線によって構成され、超電導素線に対して並列に配置するとともに、低抵抗金属からなる素線を超電導素線及び前記集合撚線と逆方向にツイストして配置される。

【0031】超電導双極電磁石の断面2は中心磁場5を作るための電流が流れる超電導導体1の集まりによって形成されており、場所によって異なる磁場に晒されている。そこで、電磁石断面内の特定の超電導導体1について考える。

【0032】超電導電磁石断面内の超電導導体1は、安定化材中に超電導フィラメントを配置した超電導素線4を複数本、所定のトランスポジションで撚り合わせた集合体でできている。この撚り合わせは、前記撚り合わされた(以下、「ツイストされた」と称する。)超電導素線の集合撚線を単位とし、複数の撚線をさらに少なくとも1回ツイストして形成される。その場合、前記ツイストされた超電導素線と、この超電導素線の集合撚線とのツイスト方向は同一である。超電導導体1が晒されている磁場の磁束密度3の、超電導導体1の長手方向(縦方向)に垂直な成分を B_{c} 、超電導導体1の長手方向に平行な成分を B_{b} とし、さらに、これら二つの方向の電気抵抗率をそれぞれ ρ_{c} 、 ρ_{b} とすると、超電導導体1の断面アスペクト比 b/a を、上記超電導素線間の結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{b}}$ が最小となるように(最小に近付けるように)あらかじめ設計することにより、超電導素線4間の結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{b}}$ を低減することができる。ここで、 $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{c}}$ の値については、計算もしくは測定によって決定することができ、また、 $B_{\text{c}}/B_{\text{b}}$ の値については、経験磁場が最大であることが知られている部位6の超電導導体1が晒されている磁場の計算値を単独に用いる方法や、電磁石の断面を形成する個々の超電導導体1が晒されている磁場を計算する方法が考えられる。このうち後者では、超電導電磁石全体の超電導素線4の結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{b}}$ の合計を最小にするように超電導導体の断面アスペクト比 b/a を決定することができる。

【0033】以下、超電導双極電磁石の断面において、中心磁場5を作るための電流が理想的な $\cos\theta$ 分布をするように超電導導体1が巻かれていると仮定して、超電導電磁石全体の超電導素線4間の結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{d}}$ の合計を最小にするような超電導導体1の断面アスペクト比 b/a を評価する。

【0034】図3(a)において、符号21で示した部分は、この評価で模擬した電流が理想的な $\cos\theta$ 分布をするように巻かれている超電導双極電磁石の断面であ

$$n(\theta) = (N/2) \cos\theta \quad \dots (12)$$

で与えると(Nは全巻数)、各々の θ の値に対応する超電導素線間結合損失 dP_{c} 、 dP_{d} はそれぞれ、

$$\begin{aligned} dP_{\text{c}} = & \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \} \cdot \\ & \cdot \{ (1/\rho_{\text{a}}) (a^2 + 2a^2/3b + 7a^4/30b^2) \\ & + (1/\rho_{\text{b}}) a^2/6 \} B_y^2 (N/2) \sin^2\theta \cos\theta d\theta \quad \dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dP_{\text{d}} = & \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \} \cdot \\ & \cdot \{ (1/\rho_{\text{b}}) (b^2 + 2b^2/3a + 7b^4/30a^2) \\ & + (1/\rho_{\text{a}}) b^2/6 \} B_y^2 (N/2) \cos^2\theta d\theta \quad \dots (14) \end{aligned}$$

となり、これらを $\theta=0$ から $\theta=\pi/2$ まで加え合わせることにより全結合損失を得る。

★

$$\begin{aligned} P_{\text{c}} = & \int^{\pi/2}_0 dP_{\text{c}} = \\ & = (1/3) B_y^2 (N/2) \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \} \cdot \\ & \cdot \{ (1/\rho_{\text{a}}) (a^2 + 2a^2/3b + 7a^4/30b^2) \\ & + (1/\rho_{\text{b}}) a^2/6 \} \quad \dots (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{d}} = & \int^{\pi/2}_0 dP_{\text{d}} = \\ & = (2/3) B_y^2 (N/2) \{ L p^2 / 16 (a+b)^2 \} \cdot \\ & \cdot \{ (1/\rho_{\text{b}}) (b^2 + 2b^2/3a + 7b^4/30a^2) \\ & + (1/\rho_{\text{a}}) b^2/6 \} \quad \dots (16) \end{aligned}$$

となる。ただし、 B_y は磁束密度のY成分である。

【0036】上記(15)及び(16)式における係数 $1/3$ 、 $2/3$ をそれぞれ超電導双極電磁石の超電導導体に対する縦方向磁場因子、横方向磁場因子と呼ぶ。各々の超電導電磁石の磁場分布に対応する磁場因子によって超電導導体の断面アスペクト比 b/a を最適化することが本発明の特徴である。

【0037】以上、超電導双極電磁石を例にとって説明したが、一般に2n極の超電導電磁石において、電流が理想的な $\cos\theta$ 分布をするように超電導導体1が巻かれている場合、上記縦方向磁場因子、横方向磁場因子はそれぞれ $1/3n$ 、 $2/3n$ となることが同様に示される。

【0038】図5に縦方向磁場因子、横方向磁場因子がそれぞれ $1/3$ 、 $2/3$ の場合における全結合損失(規格化損失) $P_{\text{c}} + P_{\text{d}}$ の $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{a}} = 1$ の場合のアスペクト比 b/a に対する変化の様子を示す。この図から、電流が理想的な $\cos n\theta$ 分布をするように超電導導体1が巻かれており、鉄芯7の効果により超電導導体1が巻かれている領域において磁場コイル内部領域の理想的な成分のみを持つと仮定した場合、現存する粒子加

まり、図3(b)における符号22で示した部分は、実際の計算に用いた $\cos\theta$ 分布の層状電流を示している。簡単にするために、超電導双極電磁石には鉄芯7が付いており、超電導導体1が巻かれている領域において磁場の磁束密度3はそのY成分のみを持ち、かつ、各々の超電導導体1が原点Oに対して放射状に位置して巻かれていると仮定する。電流が $\cos\theta$ 分布をするための超電導導体1の巻線密度 n を図3(b)のX軸からの角度 θ の関数として、

30 速器用超電導電磁石の超電導導体1の断面形状($b/a = 6 \sim 12$)では超電導素線間結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{d}}$ が大きいことがわかる。なお、図5においては、アスペクト比 b/a が約8以上の場合については図示を省略した。

【0039】図6に $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{a}}$ の変化に対して超電導素線間結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{d}}$ の最小値を与える断面アスペクト比 b/a の値の変化を示す。現在の粒子加速器用超電導電磁石の $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{a}}$ の値を1以下と考えると、図6により、超電導素線間結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{d}}$ の合計を最小にするような超電導導体の断面アスペクト比は、製造上及び完成品の形状上の制限を考慮してほぼ1であるといえる。

40 【0040】すなわち、アスペクト比が小さくなることはフラットワイズで巻き回される曲げ半径 r に対して a/r に比例する端部巻線時の歪が大きくなることを表している。この対策として撚線の中央部に抵抗率の高い部材を配置した超電導導体について考える。この場合、 $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{a}}$ の値が大きくなると考えられる。このときの $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{a}}$ の値を3~10程度と考えると、図6により、 $\rho_{\text{b}}/\rho_{\text{a}} > 1$ において超電導素線間結合損失 $P_{\text{c}} + P_{\text{d}}$

。" の合計を最小にするような超電導導体 1 の最適断面アスペクト比 b/a は約 1~2 であることがわかる。実際に採用する断面アスペクト比 b/a としては、上記歪の影響、製作性や費用を検討することにより、これより僅かに大きい約 3 が望ましい。これは、先に挙げた実際の超電導双極電磁石の断面アスペクト比 b/a のいずれと比較しても $1/2 \sim 1/4$ の値となっている。なお、上記抵抗率の高い部材は、例えば CuNi あるいは CuSn のように抵抗率の高い金属の少なくとも一方を主成分とする材料、もしくは抵抗率の高い合成樹脂からなる絶縁材によって形成される。

【0041】本発明の特徴である、各々の超電導電磁石の磁場分布に対応する磁場因子によって超電導導体 1 の断面アスペクト比 b/a を最適化することは粒子加速器用超電導電磁石以外の超電導電磁石にも容易に適応できる。例として、代表的なソレノイドコイル及びトロイドコイルの磁場分布の状態及び本発明を適用した場合の断面形状の概略を図 7 及び図 8 に示す。

【0042】図 7において、(a) はソレノイドコイルの磁場分布の様子を、(b) は本発明を適用した場合の断面形状を表しており、また、(c) はソレノイドコイル装置の外観を表す。ソレノイドコイルは全体の断面 2 の磁場分布を用いて各々の部位の超電導導体 1 の断面アスペクト比 b/a を最適化する目的で全体を 3 段に分割して巻き回されている。この例では磁束密度の比 B_1/B_2 が大きな値をとる磁石の軸中央部 10 では超電導導体 1 の断面アスペクト比 b/a は 4 に設定され、 B_1/B_2 の値が 1 に近い磁石の軸中央部両端 11 ではアスペクト比 b/a が約 1 に設定されている。さらにそれよりも端部側の軸端部 12 では B_1/B_2 の値が 1 よりも小さくなるのに対応して超電導導体の断面アスペクト比 b/a が約 0.4 に設定され、コイルの軸両端部側に移動するに従ってコイル軸中央部のアスペクト比より小さくなっている。ここで、アスペクト比 b/a が 1 以下から 1 以上にまたがる場合は同方位に基準を揃えて表示した。

【0043】さらに、図 8において、(a) は本発明を適用した場合のトロイドコイルの断面形状を表しており、(b) はトロイドコイル装置の外観を表す。トロイドコイルは全体の断面 2 の磁場分布を用いて各々の部位の超電導導体の断面アスペクト比 b/a を最適化する目的で全体を 2 段に分割して巻き回されている。この例では磁束密度の比 B_1/B_2 が大きな値をとる磁石の軸中央部 10 では超電導導体 1 の断面アスペクト比 b/a は 4 に設定され、 B_1/B_2 の値が 1 に近い磁石の中央部両端 11 ではアスペクト比 b/a は約 1 に設定されている。

【0044】

【発明の効果】本発明によれば、超電導磁石の主たる構

成要素である超電導導体において、特に素線間の結合損失を少なくするために素線を所定のピッチでツイストして形成した超電導導体およびこの超電導導体を用いた交流超電導電力機器において、超電導導体断面のアスペクト比と磁場、及び超電導導体内の抵抗との相関が結合損失に及ぼす影響を考慮し、超電導素線間の結合損失が小さいような断面形状を持つ超電導導体を用いることにより、クエンチ特性に優れ、全体の電力消費量が小さく、磁場均一性の高い交流超電導磁石及び当該超電導磁石を使用した粒子加速器などの電力機器を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の実施例に係る超電導双極電磁石の超電導導体の断面形状を示す説明図である。

【図 2】実施例に係る粒子加速器用超電導双極磁石の外観を示す斜視図である。

【図 3】電流が理想的な $\cos \theta$ 分布をするように巻かれている超電導双極電磁石の断面形状及び $\cos \theta$ 分布の層状電流を示す説明図である。

【図 4】超電導導体の負荷率の定義を示す説明図である。

【図 5】超電導磁石全結合損失の超電導導体断面アスペクト比に対する変化を示す図である。

【図 6】超電導磁石全結合損失の超電導導体断面アスペクト比の最小値の電気抵抗率比に対する変化を示す図である。

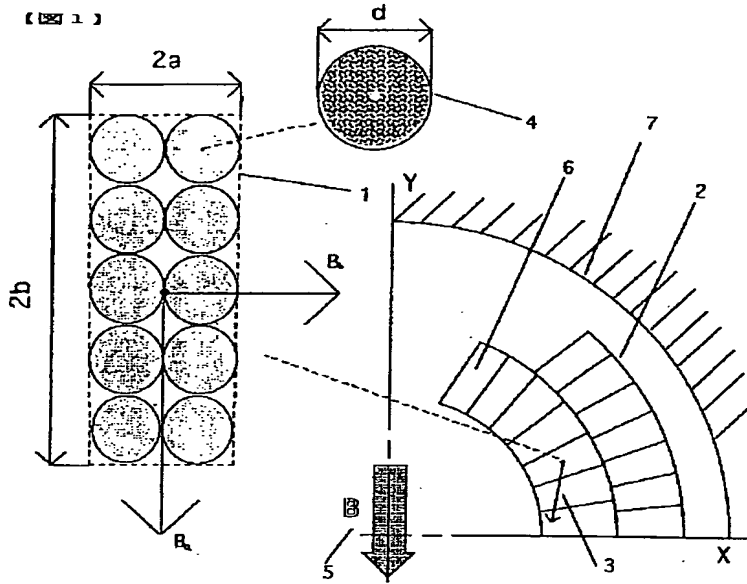
【図 7】本発明を適用した超電導ソレノイド電磁石を示す説明図である。

【図 8】本発明を適用した超電導トロイド電磁石を示す説明図である。

【符号の説明】

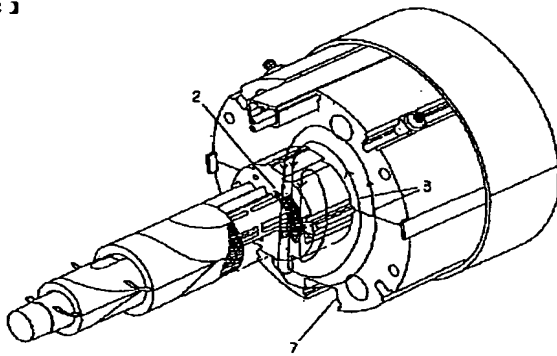
- 1 超電導導体
- 2 超電導双極電磁石の断面
- 3 磁場の磁束密度
- 4 超電導素線
- 5 中心磁場
- 6 超電導導体が晒されている磁場が最も大きい部位
- 7 鉄芯
- 8 超電導導体が経験する磁場とその磁場における臨界電流密度との関係
- 9 超電導導体に流れる電流の密度とそのときに発生する磁場との関係
- 10 ソレノイドまたはトロイド電磁石の軸中央部の超電導導体
- 11 ソレノイドまたはトロイド電磁石の軸中央部両端の超電導導体
- 12 ソレノイドまたはトロイド電磁石の軸両端部の超電導導体

【図1】



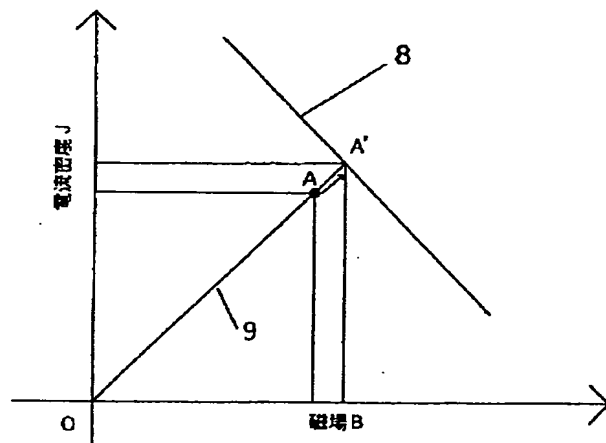
【図2】

【図2】



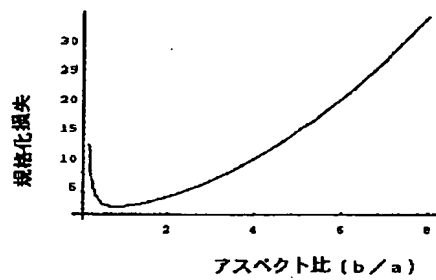
【図4】

【図4】



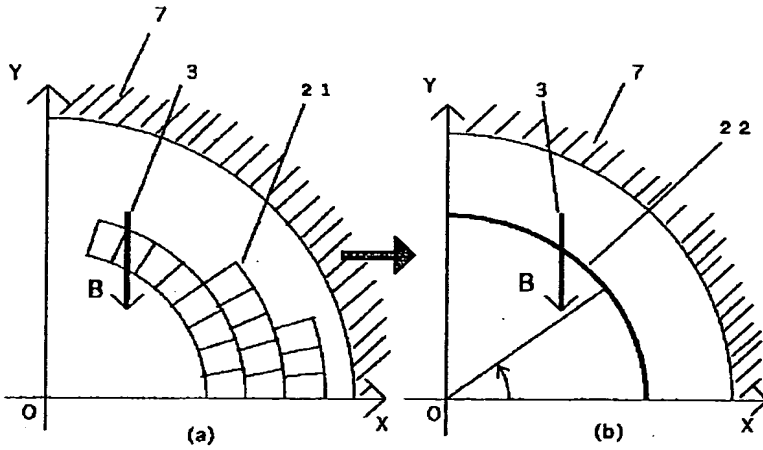
【図5】

【図5】



【図3】

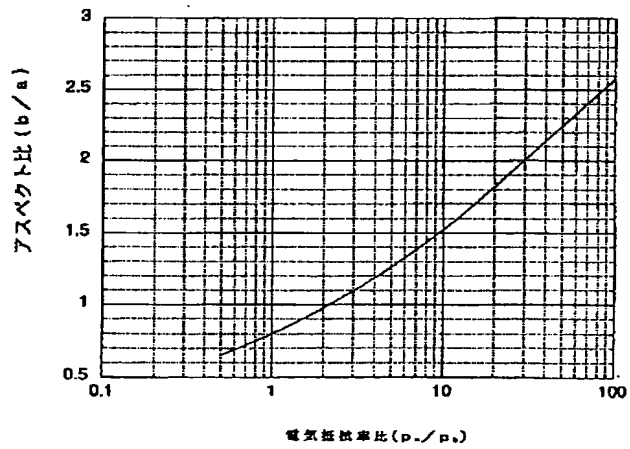
【図3】



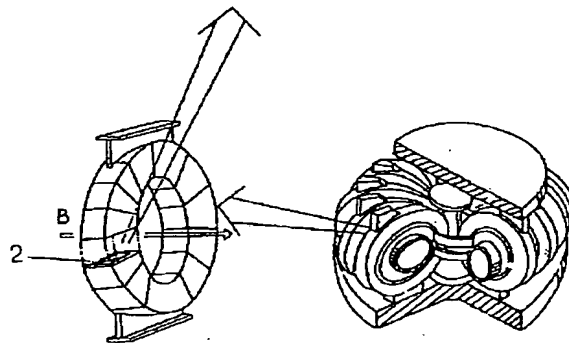
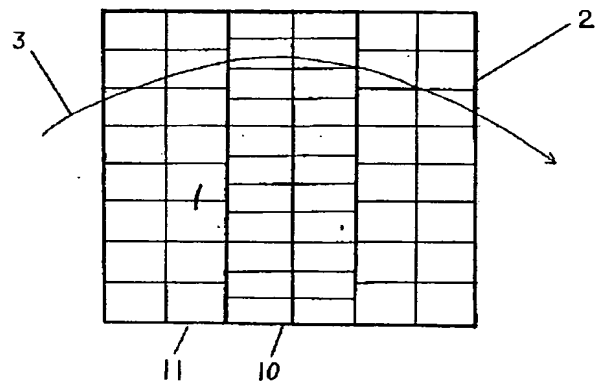
【図6】

【図8】

【図6】

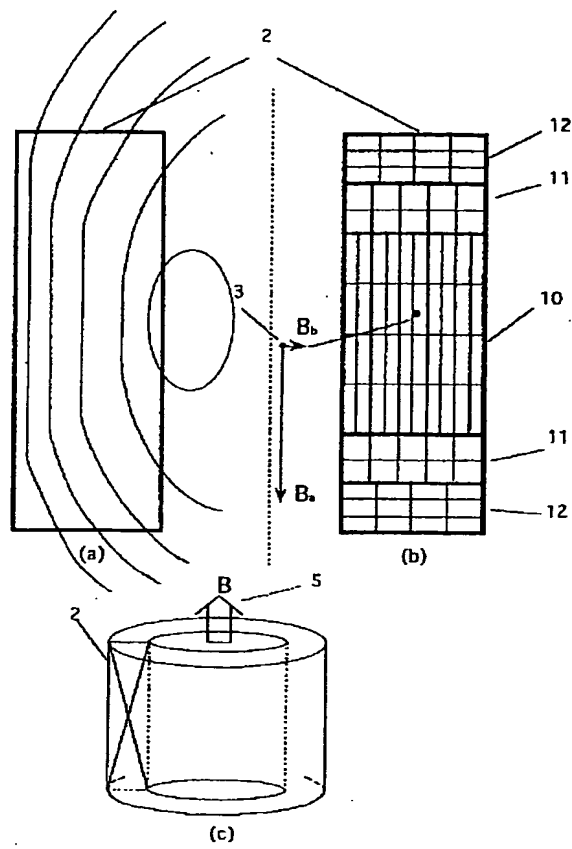


【図8】



【図7】

【図7】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.